形状記憶合金アクチュエータを用いた超小型材料試験機の開発[†]

荒井 正行*

Development of Small-Size Material Testing Device Using Shape Memory Alloy Actuator

by

Masayuki ARAI *

Some electrical appliances, such as mobile phones, have been miniaturized recently to create them in wearable form, because the size of the devices incorporated in those appliances has become remarkably smaller and thinner. For instance, a semiconductor device consisting of a laminated thin-film structure deposited onto a thin substrate by a physical vapor deposition technique is well known. When these laminated devices are designed, the mechanical property of each thin-film material is required. However, current device design is based on bulk material data. To satisfy the technical requirements, testing devices for measuring the mechanical property of a thin-film material have been developed. The devices become large despite a very small-sized specimen to precisely control the testing waveform. In this study, to achieve more-compact testing devices, a shape memory alloy wire was adopted as a new actuator, and all testing functions of an actuator, load amplification, load cell, and displacement sensor were combined in one unit. For checking the motion of the developed device and the PID control system developed based on an Arduino system, tensile and fatigue tests were conducted for SUS304 thin film. It was confirmed that the tensile and fatigue tests were carried out appropriately according to the control pattern.

Key words:

Small-size material testing device, Shape memory actuator, Thin film, Tensile test, Fatigue test

1 緒 言

近年、パソコンやスマートフォンなどの電子機器は、小型・高性能化が急速に進められている。これら電子機器は、薄膜積層構造体から構成されている。このため、薄膜積層構造体の設計やその信頼性を保証するためには、薄膜材料そのものの機械的特性をあらかじめ把握しておく必要がある¹⁾。

つぎに火力発電所や原子力発電所などに代表される大型プラントについて考えてみよう。これら構造物の損傷状態を把握するために、構造物から直接 JIS Z2241 に従った比較的大きな試験片が切り出される²⁾。しかしながら、運用中の構造物に対してこの様な方法を適用することは設備にダメージを与えるため不適切であるとの指摘もなされている³⁾。このような課題を克服するために、Arai により構造物の最表面から薄膜状のサンプルを切り出し、それを材料試験するという新しい損傷診断方法が提案されている⁴⁾。この手法が確立されれば、切除に伴う構造物へのダメージを最低限度に留めることができる。このため、大型構造物においても薄膜材料に対する材料試験技術の確立は重要である。

ところで、これまでの材料試験機では、油圧、空気圧、電気モータが荷重駆動源として用いられてきた⁵⁾。油圧アクチュエータの特徴として、(1)応答性に優れる、(2)大きな力を発生できる、という特徴を有する。しかし、油圧ポンプなどの大型補器を要するために試験機全体が大型化する傾向にある。一方、空気圧アクチュエータにおいては、油圧アクチュエータに比べて大きな補器を必要とせず大きな変位を生み出すことができる。しかし、

空気は密度が低いことから油圧アクチュエータに比べて応答性にやや劣る。また、発生しうる力も小さい。最後に電気モータの特徴として、他のアクチュエータと比べて試験機の構成をコンパクト化できる点が挙げられる。しかしながら、モータの比容積・質量に対する駆動力が相対的に低い、回転運動を直線運動に変換するための機構を別途準備する必要があるなど問題点もある。

以上に述べたように、本研究で対象としている試験片サイズが微小でかつ薄膜状であるため、それに応じて試験機の小型化も達成されれば、例えば電子顕微鏡や分析装置との組み合わせのもと薄膜材の損傷、破壊メカニズムの解明にも資することが期待される。この際、変位精度に優れ、制御上最もコンパクトなアクチュエータを見出すことが本開発を進める上でのカギといえよう。

これらの背景に鑑みて、Arai は圧電セラミックスをアクチュエータとした小型材料試験機を開発してきた⁶⁾。圧電セラミックスアクチュエータは、ピエゾ効果により、電圧を印可することでセラミックスが変形する現象を利用したものである⁷⁾。アクチュエータを駆動するための特別な補器を必要とせず、ファンクションジェネレータから発信された電気信号を増幅し、この増幅された電圧により圧電セラミックスを直接駆動、制御できる点に特徴がある。大きな力を発生できる反面、発生する変位が数ミクロンと小さい。このため、変位をなるべく大きくするために圧電セラミックスを多数積層し、アクチュエータの全長を長くするなど工夫がなされてきた。ただし、このような工夫は必然的に材料試験機のコンパクト化に制約を与えてきた。

[†] 原稿受理 平成 30 年 3 月 11 日 Received Mar. 11, 2018 ©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 東京理科大学工学部機械工学科 〒125-8585 東京都葛飾区新宿

Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science, Katsushika-ku, Tokyo, 125-8585.

このため本研究では、新たなアクチュエータとして形状記憶合金 (SMA: Shape Memory Alloy) ワイヤーに注目し、これによる材料試験機の開発を試みた。SMA ワイヤーは、人工筋肉のために開発されたものであり、大きなたわみを許容し、微弱な印可電圧に対して大きな変位を発生できる。ただし、発現する力は圧電セラミックスのそれに比べて小さい。このため、てこによる増幅機構と組み合わせることで大きな力が試験片に作用できるように工夫した。本報告では、開発した試験機の概要とステンレス薄膜材 SUS304 鋼を対象に行った引張試験、疲労試験の結果を示す。

2 開発した超小型材料試験機

2・1 試験機の概要

本研究では超小型材料試験機を開発するうえでつぎのような目標を掲げた。

- (1) 試験機のサイズを手のひらに載せられるほどの小型なものにする。
- (2) 試験機は、大掛かりな補器を用いず、ノートブックによりすべての制御とモニタリングを行う。

このような目標を達成するために考案した試験機の概要図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 (a)は試験機の断面図、Fig. 1 (b)は CAD 図を示している。また、Fig. 2 に試作した試験機の外観を示す。考案した試験機は、アクチュエータとして SMA ワイヤー、試験片チャック部 (D 部)、SMA アクチュエータと試験片チャック部を結びつける弾性ヒンジ (C 部) とフレーム (A と B 部)、からなるシンプルなものである。SMA ワイヤーが収縮することにより弾性ヒンジを介してフレームが開くように変形し、試験片に引張荷重が作用するようになっている。弾性ヒンジから SMA ワイヤーまでの距離と弾性ヒンジから試験片までの距離の比によりこの原理により荷重が増幅される。

Fig. 1 Concept of small-size testing device.

Fig. 3 に試験機の SMA ワイヤー取付部の外観を示す。図のように SMA ワイヤー両端を端子とネジ、ボルトによ

って固定し、8 本のネジに S の字を描くようワイヤを引っ掛けた。また、試験片に生じる荷重はフレームに取り付けたひずみゲージにより、変位は渦電流変位センサにより検出した。

Fig. 2 Small-size testing device developed in this study.

Fig. 3 SMA actuator.

以下に本試験機の動作原理について述べる。

- 1) 外部電源を介して SMA ワイヤーに直流電流を通電し、発熱させることでアクチュエータを収縮させる。
- 2) 弾性ヒンジ部がフレームの支点となり、アクチュエータが収縮することで試験部が引張り方向に変位する。この結果、試験部に取り付けられた試験片には引張力が働くことになる。
- 3) フレームにはくびれ加工がなされており、ここにひずみゲージを取り付けることでロードセルの役割をフレームに持たせる。これにより開発目標であった試験機の小型化が達成できる。

フレームの材質にはアルミニウム合金を用い、試験機の軽量化を図っている。また、弾性ヒンジには 0.1[mm] 厚さの SUS304 板を用い、適当な復元力を発現できるようにしている。

本試験機の特徴をまとめると次のようになる。

- ・弾性ヒンジを利用することで試験部とアクチュエータを一体化している点。
- ・アクチュエータに SMA ワイヤーを用いているために PC ベースでの制御が可能な点。
- ・フレームにロードセルの役割を持たせている点。

以上により試験機を手のひらサイズにまで小型化できるとともに、軽量化することが可能となった。

2・2 駆動回路

開発した試験機を作動させるための駆動回路を Fig. 4 に、試作した電子回路基板の外観を Fig. 5 に示す。Fig. 4 (a)の試験機の駆動回路の入出力は、Fig. 4 (b)に示す Arduino UNO と呼ばれるマイクロコンピュータとつなが

っており、これらは USB(Universal Serial Bus)を介して PC とデータ通信を行っている。まず、Arduino の PWM 出力とデジタル出力は、Fig. 4 (a)の Arduino 用モーターシールドと接続されている。これにより、モーターシールドに接続されている外部電源から、SMA に対してどの程度の電圧を負荷するかを操作する。

(a)Circuit diagram for testing device

(b)Circuit diagram for Arduino

Fig. 4 Circuit diagrams to control loading pattern.

Fig. 5 Appearance of electric circuit board.

アクチュエータとして採用した SMA ワイヤーはトキコーポレーション製の BMF150 である。本 SMA は、通電させジュール発熱することによって縮む性質を持つ。Table 1 に SMA ワイヤーの仕様を示す。

ロードセルは、2 ゲージ法によってふたつのフレームに生じているひずみの大きさを試験片に作用する荷重に変換するというものである。フレームに接着したひずみゲージ(共和電業、製品番号 KFG-02-120-C1-11L1M2R)の抵抗を R_r , R_l とすると、ロードセル出力 e_{load} は、入力電圧 E と次のように関係づけられる。

$$e_{load} = \frac{(R_r R_l - R^2)}{(R_r + R)(R_l + R)} E \quad (1)$$

試験機が作動するとき、ロードセル部は圧縮されるため、負の値の電圧を出力する。しかし、Arduino UNO は正の値の電圧しか受け取れないので、これを反転する必要がある。そこで、オペアンプによる反転回路を挿入した。これにより、本来のロードセル出力を e_{load} , 反転した値を V_{load} とすると、以下のような関係となる。

$$V_{load} = -\frac{R_1}{R_2} e_{load} \quad (2)$$

また、渦電流変位センサからの出力電圧は非常に小さく、制御信号として用いるには同電圧信号を増幅する必要がある。このため、オペアンプによる非反転増幅回路を組んだ。本来の変位センサ出力を e_{sensor} , 増幅した値を V_{sensor} とすると、

$$V_{sensor} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) e_{sensor} \quad (3)$$

と表せる。ここで、渦電流変位センサは、キーエンス製 AH-305 を使用した。Table 2 に本センサの仕様を示す。また、Table 3 に駆動回路に必要な供給電源ならびに電気信号の増幅のために用いた抵抗値 R, R_i ($i = 1, \dots, 4$) をまとめたものを示す。

Table 1 Specification of SMA wire (BMF150).

Standard diameter [mm]	φ0.15
Maximum generated load [N]	1.47
Maximum strain [%]	4.0
Fatigue life [cycle]	1000000
Standard drive current [mA]	340
Standard drive voltage [V/m]	20.7
Standard resistance [Ω]	61

Table 2 Specification of displacement sensor (AH-305).

Standard diameter [mm]	φ5.4
Measuring range [mm]	0~1
Output voltage [V]	0-1
Impedance [Ω]	100
Resolution [%]	0.1 of F.S.
Linearity [%]	±1 of F.S.
Sensor head weight [g]	45

Table3 Value of resistance and supply voltage.

Name	Value and model number
Vin	DC12[V]
E	AC100[V]
R	Depending on dynamic strain meter: AS1103(KYOWA)
R ₁	10[kΩ]
R ₂	10[kΩ]
R ₃	1[kΩ]
R ₄	22[kΩ]
OP	LM358N
SMA	BMF150(TOKI CORPORATION)
Displacement Sensor	Sensor:AH-305,Amp:AS-440-01(KEYENCE)
Motor Shield	Arduino Motor Shield

これら V_{load} , V_{sensor} は、Arduino にアナログ信号として入力され、USB 接続された PC にそれらの値が表示され

る。また、荷重制御の場合は V_{load} 、変位制御の場合は V_{sensor} の値を用いて、Fig. 6に示すPID制御を行う。

Fig. 6 PID control diagram.

2・3 ロードセルの較正

本節では、試験機に組み込んだロードセルの較正を行った結果を示す。

試験片に生じた試験力はつぎのようにして測定した。厚さ 10[μm]、幅 5[mm]の SUS304 フィルム(ニラコ社製)の中央にひずみゲージ(共和電業、製品番号 KFG-02-120-C1-11L1M2R)を貼り、これを試験機チャック部に瞬間接着剤で固定した。試験力 F [N]は、ひずみゲージの出力に弾性係数を乗じることで簡単に求められる。

本試験機においては、フレームにおけるくびれ部と反対側の平滑面にひずみゲージ(共和電業、製品番号 KFG-02-120-C1-11L1M2R)を接着し、これをロードセルとした。

Fig. 7 Relationship between testing load and load cell strain.

試験力とロードセル部におけるひずみ値の関係を調べるために、ロードセル部に装着したひずみゲージの出力をPID制御の制御値とし、フィルム中央部に接着したひずみゲージによる試験力と比較した。Fig. 7に試験結果を示す。図中の Raise Value はロードセル部ひずみ上昇時の値、Down Value はロードセル部ひずみ減少時の値である。この測定結果から、上昇時ならびに減少時ともに試験片での試験力とロードセル部でのひずみの間には比例関係が成立していることが確認できる。ただし、試験力が低いレベルにて 1.5[%]/FS 程度の誤差が生じていた。これは2・1節で説明したように SMA ワイヤをボルトに巻き付けることでアクチュエータを作製している。このため、試験力の増加、減少時にワイヤとボルトの接触状態が微視的に変化したためにこのような誤差が生じたものと考えられた。

本研究では、Fig. 7の結果に基づいて以下をロードセルの較正式とすることとした。

$$F_s = 0.03534\varepsilon_L + 0.4619 \quad (0 \leq F_s \leq 30[N]) \quad (4)$$

2・4 周波数-最大振幅特性

SMA ワイヤをアクチュエータとした本試験機により疲労試験を行う際には、あらかじめアクチュエータの動特性を把握しておく必要がある。このため、本試験機の周波数と最大変位振幅の関係(以下、周波数-最大振幅特性と呼ぶ)を明らかにしておく。周波数-最大振幅特性とは、試験機チャック部に試験片が装着されていない、無負荷状態において、アクチュエータに最大駆動電圧がある周波数で繰返し印可した際に、試験片チャック部で生じた最大変位振幅量がどのように変化するか調べたものである。

本試験においては、試験片チャック部に装着した渦電流変位センサ(キーエンス社、製品番号 AH-305)による変位値を制御値としてPID制御を行う。制御波形は三角波形とした。このようにして得られた周波数-振幅特性をFig. 8に示す。周波数が 0.1[Hz]以下では、最大振幅は 0.15~0.16[mm]程度となった。これは本試験機の機構上最大の変位量にほぼ一致する。これに対して周波数が高くなり、2[Hz]になると最大変位振幅量は 0.04[mm]程度まで低下する。よって、この周波数以上になると疲労試験が行えないことがわかった。このように高周波数領域で疲労試験が行えなかった理由として SMA ワイヤに生じた発熱が原因と考えられる。低周波数では、アクチュエータ駆動のために発熱した SMA ワイヤが冷却されるまでに十分な時間があつた。しかし、次第に周波数が高くなるにつれて SMA ワイヤを冷却するための時間を十分にとることができなくなる。

Fig. 8 Relationship between amplitude and frequency.

2・5 超小型材料試験機のスペック

以上の試験結果に基づき本研究で開発した超小型材料試験機のスペックをまとめると Table 4 のようになる。

Table 4 Specification of small-size testing device.

Max tensile testing load	30[N]
Min tensile testing load	0[N]
Max frequency	2[Hz]
Max amplitude	0.16[mm]
Min amplitude	0[mm]
Disp. resolution	0.1[%]/FS

3 SUS304鋼薄膜材の引張・疲労試験

3・1 供試材ならびに試験方法

本研究で開発した試験機を用いて、薄膜材の引張試験および疲労試験を行った。本試験に供した材料はオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)であり、圧延された平板素材から放電加工により所定の形状となるよう加工

した。試験片の形状を Fig. 9 に示す。マイクロメータの測定により、引張試験に供した薄膜材の厚さは $52[\mu\text{m}]$ 、疲労試験のそれは $54[\mu\text{m}]$ であった。

これらの試験片を、試験機チャック部に瞬間接着剤(東亜合成, アロンアルファ)で接着した。引張、疲労試験ともに荷重制御により試験を行った。引張試験では負荷速度 $0.6[\text{N/s}]$ で試験時間を 50 秒、疲労試験では周波数を $0.1[\text{Hz}]$ とした。

Fig. 9 Thin film specimen geometry.

3・2 引張試験結果

Fig. 10 に本薄膜試験片の応力-変位線図を示す。図より、変位とともにほぼ線形に応力が増加するとともに、降伏応力に達した後、変位とともにゆるやかに応力が増加するようになる。すなわち、ステンレス鋼に見られる典型的な応力-変位曲線である。ここで、本線図において変位のゼロ点がやや外れているが、実際に測定された応力-変位線図においては変位とともに応力が緩やかに増加したことによる。この非線形挙動を除去したため図のようにゼロ点がやや外れたように示されている。このような非線形挙動を示した理由は試験機の構造による。すなわち、開発した試験機においては弾性ヒンジを介して試験側とアクチュエータ側をフレームで接合させている。これに加えてアクチュエータ部で SMA ワイヤをフレームに設置したボルトに引っ掛けるような構造となっている。このため、弾性ヒンジの非可逆性挙動、ワイヤとボルトの接触状態が影響し、ワイヤ収縮とともに小さな試験力レベルではワイヤとボルトの接触ならびに弾性ヒンジの変形が関与して変位とともに応力がやや非線形に増加したと考えられる。なお、周知のように一般の材料試験機においてもクロスヘッド変位と荷重の間において荷重レベルが小さい領域では非線形性が認められる。このため、今後試験片に生じているひずみを検出することでこのような問題は解消できるものと考えられる。

Fig. 10 Stress-displacement diagram for SUS 304 thin film specimen with thickness of $52[\mu\text{m}]$.

結果は省略するが、バルク材の引張試験によれば伏応力は $180[\text{MPa}]$ であった。これに対して本応力-変位曲線から得られた降伏応力は $272 [\text{MPa}]$ であった。なお、ここで言う降伏応力は、 0.2% 耐力の定義とは異なり、同線図における直線から外れた点での応力を降伏応力と定義した。このように定義された降伏応力においてもバルク材のそれに比べて高い。このことから、化学成分が同一であっても薄膜材はバルク材に比べ降伏応力が高いことがわかった。なお、これまでも同様の傾向が指摘されている⁸⁾。引張応力が降伏応力に近づくと、薄膜厚さ方向に転位が活発に移動するようになる。しかし、この転位の移動は薄膜表面に近づくにつれて固着して動きにくくなり、このために降伏応力が上昇するとの物理的メカニズムが提案されている。

3・3 疲労試験結果

試験波形を Fig. 11 に示す。図より、荷重制御に基づく疲労試験が適切に行われていることが確認できる。

繰返し数 n が 1, 5, 10 のときの応力-変位線図を Fig. 12 に示す。繰返し数 $n = 1$ にて変位に比例して応力が増加し、降伏点に達すると変位に伴う応力の増加がゆるやかになり試験片は塑性変形をする。除荷時には、弾性変形時と同じ傾きで応力が減少し、無負荷になると永久変形が生じる。その後、再負荷時に除荷時に描いた線図に沿って変位とともに応力が増加する、いわゆるシェイクダウン現象が認められる。結局、本疲労試験を 4200 サイクルまで行ったが、疲労寿命には至らなかったため、途中で試験を止めた。

Fig. 11 Stress wave form controlled by PID.

Fig. 12 Stress-displacement curve in cyclic loading.

4 結 言

本研究では、薄膜・微小材料の機械的特性を測定することが可能な超小型材料試験機の開発を行った。材料試験機の超小型化のために、新たなアクチュエータとして形状記憶ワイヤーに注目した。ただし、形状記憶ワイヤーは、人工筋肉のために開発されたものであり、大きなたわみを許容し、微弱な印可電圧に対して大きな変位を発生できる。ただし、これまでのアクチュエータに比べて発現しうる力は小さい。このため、てこによる増幅機構をコンパクトな構造のもとに実現するため、弾性ヒンジを介して長さが異なるフレームを配置し、その両端に試験片固定部とアクチュエータを設置した。これにより手のひらサイズにまで試験機の大きさを小さくすることに成功した。ステンレス薄膜材 SUS304 鋼を対象に引張試験、疲労試験を行い、開発した試験機が適切に動作していることを示した。

参 考 文 献

- 1) F. M. Mwema, O. P. Oladijio, S. A. Akinlabi, E. T. Akinlabi, K. Ohnishi and S. Matsuda, "Properties of physically deposited thin aluminum film: a review", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.747, No.30, pp.306-323 (2018).
- 2) A. Garzillo, C. Guardamagna, L. Moschetti and L. Ranzani, "A technique for the residual life assessment of high temperature components based on creep-rupture tests on welded miniature specimens", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 66, Issue 1-3, pp.223-232 (1996).
- 3) R. Viswanathan, "Residual life technique for plant life extension", *Material Science and Engineering: A*, Vol. 103, No. 1, pp.131-139 (1988).
- 4) M. Arai, "Development of in-situ high-temperature small fatigue testing device by SEM", *Kikai No Kenkyu*, Vol.59, No.3, pp.353-361 (2007).
- 5) M. Arai, "Toward an unknown field in material testing device in future", *TEST*, Vol.14, pp.28-29 (2010).
- 6) M. Arai and T. Ogata, "Development of small fatigue testing machine for thin film", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series. A*, Vol.68, No.669, pp.801-806 (2002).
- 7) K. Motoo, N. Toda, F. Arai, T. Fukuda, T. Matsuno, K. Kikuta and S-I. Hirano, "Tailor-made multilayer piezoelectric actuator having large displacements and forces", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series. C*, Vol.72, No.722, pp.3302-3308 (2006).
- 8) C. Zhou and R. LeSar, "Dislocation dynamics simulations of plasticity in polycrystalline thin film", *International Journal of Plasticity*, Vol.30-31, pp.185-201 (2012).
- 9) H. Waki, K. Takizawa, M. Kato and S. Takahashi, "Accuracy of Young's modulus of thermal barrier coating layer determined by bending resonance of a multilayered specimen", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol.25, Issue 4, pp.684-693 (2016).